克服窗口玻璃影响的辐射测量方法

赵越[1] 徐东耀[1] 俞伦鹏[2]
（[1]中国矿业大学（北京）化学与环境工程学院，北京 100083
[2]北京南奇星科技发展有限公司，北京 100176）

摘　要：对于有窗口玻璃的高温炉的温度测量，如何克服窗口玻璃的影响一直是个难题。本文介绍一种方法，采用增加 1 块相同窗口玻璃 2 次（简称为 $T_1+\Delta T$ ）测量方法，以达到消除窗口玻璃的影响；通过理论分析，通过数值模拟计算、实验验证证明该方法是可行的。通过高温黑体校准和高温辐射温度计校准应用事例，证明 $T_1+\Delta T$ 克服窗口玻璃的辐射测温方法，具有科学性，合理性，方法简单，方便实用。对于有窗口玻璃的高温炉辐射温度测量、高温辐射温度计的量值传递等应用，具有指导意义。

关键词：窗口玻璃；测量方法；辐射测温；高温黑体；校准
中图分类号：TK124　　　**文献标识码**：A

Radiation Measurement Methods To overcome the effects of window glass

ZHAO Yue[1]　XU Dong-Yao[1]　YU Lun-Peng[2]
([1]*School of Chemical and Environmental Engineering, China University of Mining and Technology-Beijing, Beijing 100084, China*
[2]Beijing nanqixing Technology Development Co. Ltd., Beijing 100176,chima)

Abstract: For the temperature measurement of high- temperature furnaces with window glass. how to overcome the effects of the window glass has been a problem. This paper describes a method of using the a same window glass, 2 times (referred to as $T_1+\Delta T$) measurement method, in order to achieve the impact of the elimination of window glass. By theoretical analysis, numerical simulation, experimental verification shows that the method is feasible. By radiation temperature calibration of a high-temperature blackbody and of a high-temperature radiation thermometer, these application examples to prove that $T_1+\Delta T$ radiation thermometry method overcoming the window glass is a scientific, rational, simple, convenient and practical. For radiation temperature measurement of the furnaces with window glass , high-temperature radiation thermometer value transfer and other applications, is instructive.

Key words: Window glass；Measurement methods；Radiation thermometry；High-temperature blackbody；Calibration

0 前言

对大于 1200℃以上温度测量，通常采用辐射测量方法。在冶金、材料、以及材料热物性、温度计量测试等行业中，所涉及的高温炉温度有 1400℃、2000℃、2500℃、3000℃，最高温度可以达到 3240℃。

这些高温炉，大部分是封闭的，内部抽真空或充有氮气、氩气等惰性气体。高温炉通常留有能透光的窗口，使用辐射温度计和辐射温度传感器通过窗口对高温炉内的温度进行测量和控制。窗口材料通常为石英玻璃、红外玻璃等，但也有采用氟化钙晶体、锗晶体等其他材料。为了方便起见，以下统称“窗口玻璃”。

对于有窗口玻璃的情况下，为了克服窗口玻璃的影响，找出一种既方便又适用的辐射测温方法，很有实际指导意义和实用价值，这就是本文的目的。

1 理论分析

1.1 全辐射测量原理

对于实际物体辐射能量与温度的关系用斯忒藩—波尔兹曼定律表达为

$$E = \varepsilon\sigma_0 T^4 \tag{1}$$

E —辐射能量（也称为辐射力），W/m2；T —物体的绝对温度 K；σ_0 —斯忒藩—波尔兹曼常数，5.67×10-8W/(m2·K4)；ε —发射率。当有窗口玻璃存在时，式(1) 表达为

$$E_1 = \tau E = \tau\varepsilon\sigma_0 T^4 = \varepsilon\sigma_0 T_1^4 \tag{2}$$

E_1 —有 1 块窗口玻璃的辐射能量（也称为辐射力），W/m2；τ —为窗口玻璃的透射率 $\tau = E_1/E$ 。T_1 —为包含 1 块窗口玻璃表观温度。如果我们在辐射窗口再加一块相同的窗口玻璃，式（2）表达为

$$E_2 = \tau E_1 = \tau\tau\varepsilon\sigma_0 T^4 = \varepsilon\sigma_0 T_2^4 \tag{3}$$

E_2 —有 2 块窗口玻璃的辐射能量(也称为辐射力)，W/m2；T_2 —为包含 2 块窗口玻璃表观温度。

[1] 作者简介：赵越（1985——），男，硕士研究生，主要从事环境辐射污染与防治研究。Email：zhaoyue838@126.com

从式（1）～式（3）化简得出

$$T = T_1^2 / T_2 \tag{4}$$

设$T_1 - T_2 = \Delta T$，式（4）化简为

$$T = T_1 + \Delta T + \Delta T^2 / T_2 \tag{5}$$

前面已经叙述，对于有窗口的高温炉，工作温度都在 1000℃以上，对于式(5)，让$\Delta T^2/T_2 \le 0.5$(注意计算中的温度单位为 K)，得出

$$\begin{aligned} &1000℃ \quad \Delta T \le 25.23\ ℃ \\ &2000℃ \quad \Delta T \le 33.71\ ℃ \\ &3000℃ \quad \Delta T \le 40.45\ ℃ \end{aligned} \tag{6}$$

满足上述条件，式（5）直接化简为

$$T = T_1 + \Delta T \tag{7}$$

式(7)就是一个将舍弃误差控制在 0.5℃简化的计算公式，只要满足式（6）的要求，对于有玻璃窗口的高温炉，克服玻璃窗口的辐射温度测量变得非常简单。也就是首先测量高温炉温度，增加一块相同的玻璃窗口再测量 1 次，炉内温度为第 1 次测量温度值，加第 1 次与第 2 次温度测量的差值，以下简称$T = T_1 + \Delta T$ 方法。

1.2 单波长辐射测量原理

上面分析是基于全辐射的原理，导出的表达式简单直观。但实际测量使用的辐射温度计并不是全波长，而是单波长或波段，因此本节使用单波长辐射原理进行分析。

对于实际物体单色辐射能量与温度的关系用普朗克定律表达为

$$E_\lambda = \varepsilon_\lambda \frac{C_1 \lambda^{-5}}{e^{C_2/\lambda T} - 1} \tag{8}$$

E_λ —光谱辐射能量（也称为单色辐射力），W/m3；T —物体的绝对温度 K；C_1—常数，3.743×10-16W•m2；C_2—常数，1.4387×10-2m•K；ε_λ—物体的光谱发射率。λ —工作波长，m。

当有窗口玻璃存在时，式(8)表达为

$$E'_\lambda = \tau_\lambda E_\lambda = \tau_\lambda \varepsilon_\lambda \frac{C_1\lambda^{-5}}{e^{C_2/\lambda T} - 1} = \varepsilon_\lambda \frac{C_1\lambda^{-5}}{e^{C_2/\lambda T_1} - 1} \tag{9}$$

E'_λ —为包含 1 块窗口玻璃光谱辐射能量，W/m3；τ_λ —为窗口玻璃的光谱透射率。$\tau_\lambda = E'_\lambda / E_\lambda$；$T_1$ —为包含 1 块窗口玻璃表观温度。如果我们在辐射窗口再加一块相同的窗口玻璃，式（9）表达为

$$E''_\lambda = \tau_\lambda E'_\lambda = \tau_\lambda \varepsilon_\lambda \frac{C_1\lambda^{-5}}{e^{C_2/\lambda T_1} - 1} = \varepsilon_\lambda \frac{C_1\lambda^{-5}}{e^{C_2/\lambda T_2} - 1} \tag{10}$$

E''_λ —为包含 2 块窗口玻璃光谱辐射能量，W/m3。T_2 —为包含 2 块窗口玻璃表观温度。从式(8)～式（10）化简得出

$$e^{C_2/\lambda T} = \frac{\left(e^{C_2/\lambda T_1} - 1\right)^2}{e^{C_2/\lambda T_2} - 1} + 1 \tag{11}$$

设

$$A = \frac{\left(e^{C_2/\lambda T_1} - 1\right)^2}{e^{C_2/\lambda T_2} - 1} + 1 \tag{12}$$

将式（12）代入式（11），两边取对数化简得

$$T = \frac{C_2}{\lambda \ln A} \tag{13}$$

式（13）给出了 T、T_1、T_2之间的关系，因为计算较复杂，所以采用计算机计算，计算结果在后面叙述。

1.3 带宽辐射测量原理

目前使用的辐射温度计不仅有单波长，也有带宽（或波段，以下简称“带宽”）。也就是辐射温度计的工作波长在一个连续波长区间。如某型号的辐射温度计的工作波长为 0.8~1.05μm。因此下面将分析带宽状况下有窗口玻璃的情况。

对于实际物体，在某个$\Delta\lambda$范围内，辐射能量与温度的关系为普朗克定律在$\Delta\lambda$范围内积分，表达为

$$E_{\Delta\lambda} = \int_{\Delta\lambda} \varepsilon_\lambda \frac{C_1\lambda^{-5}}{e^{C_2/\lambda T} - 1} d\lambda \tag{14}$$

$E_{\Delta\lambda}$ —带宽辐射能量，W/m2；当有窗口玻璃存在时，式(14) 表达为

$$\begin{aligned} E'_{\Delta\lambda} &= \overline{\tau_{\Delta\lambda}} E_{\Delta\lambda} \\ &= \int_{\Delta\lambda} \tau_\lambda \varepsilon_\lambda \frac{C_1\lambda^{-5}}{e^{C_2/\lambda T} - 1} d\lambda \\ &= \int_{\Delta\lambda} \varepsilon_\lambda \frac{C_1\lambda^{-5}}{e^{C_2/\lambda T_1} - 1} d\lambda \end{aligned} \tag{15}$$

$E'_{\Delta\lambda}$ —为包含 1 块窗口玻璃在$\Delta\lambda$波长内带宽辐射能量，W/m2。$\overline{\tau_{\Delta\lambda}}$ —为窗口玻璃的在$\Delta\lambda$波长内平均带宽透射率。$\overline{\tau_{\Delta\lambda}} = E'_{\Delta\lambda} / E_{\Delta\lambda}$

如果我们在辐射窗口再加一块相同的窗口玻璃，式（15）表达为

$$\begin{aligned} E''_{\Delta\lambda} &= \overline{\tau_{\Delta\lambda}} E'_\lambda \\ &= \int_{\Delta\lambda} \tau_\lambda \varepsilon_\lambda \frac{C_1\lambda^{-5}}{e^{C_2/\lambda T_1} - 1} d\lambda \\ &= \int_{\Delta\lambda} \varepsilon_\lambda \frac{C_1\lambda^{-5}}{e^{C_2/\lambda T_2} - 1} d\lambda \end{aligned} \tag{16}$$

(9)

$E''_{\Delta\lambda}$—为包含 2 块窗口玻璃在$\Delta\lambda$波长单位内光谱辐射能量，W/m2。从式（14）～式（16）化简得出

$$\int_{\Delta\lambda} \left(e^{C_2/\lambda T} - 1\right) d\lambda = \int_{\Delta\lambda} \frac{\left(e^{C_2/\lambda T_1} - 1\right)^2}{e^{C_2/\lambda T_2} - 1} d\lambda \tag{17}$$

根据积分中值原理，式（17）转换为

$$\Delta\lambda\left(e^{C_2/\bar\lambda T} - 1\right) = \Delta\lambda \frac{\left(e^{C_2/\bar\lambda T_1} - 1\right)^2}{e^{C_2/\bar\lambda T_2} - 1} \tag{18}$$

化简为

$$e^{C_2/\bar\lambda T} = \frac{\left(e^{C_2/\bar\lambda T_1} - 1\right)^2}{e^{C_2/\bar\lambda T_2} - 1} + 1 \tag{19}$$

式中$\bar\lambda$为在$\Delta\lambda$内的积分中值波长。

式（19）与式（11）形式完全相同，完全可以导出与式（12）、式（13）相同的表达式，只是原波长λ用积分中值波长$\bar{\lambda}$代替。

2 数值计算结果

通过上面的理论分析，对于有窗口玻璃高温炉内温度测量，在全辐射的情况下，控制在一定的误差范围，可以化简成式（7）。

对于使用单波长和带宽测量时，理论分析最终为式（12）和式（13）。式（12）和式（13）计算比较复杂，因此采用计算机数值计算，计算结果见表 1。数值计算中式（12）和式（13）T、T_1、T_2的单位为 K，计算结果均转换为℃。

表 1 对于不同波长，T 与T_1 、ΔT 的对应关系

Table 1 for different wavelengths, corresponding relation between T、T_1 and ΔT

	T_1=1500℃					T_1=2000℃				
ΔT \ λ	0.665	1.0	1.6	3	5	0.665	1.0	1.6	3	5
5	1505.03	1505.03	1505.03	1505.03	1505.02	2005.02	2005.02	2005.02	2005.02	2005.02
10	1510.11	1510.11	1510.11	1510.10	1510.09	2010.09	2010.09	2010.09	2010.08	2010.07
15	1515.26	1515.26	1515.25	1515.23	1515.21	2015.20	2015.20	2010.19	2015.17	2015.15
20	1520.46	1520.46	1520.45	1520.42	1520.37	2020.36	2020.36	2020.34	2020.31	2020.27
25	1525.73	1525.72	1525.71	1525.65	1525.58	2025.56	2025.56	2025.54	2025.48	2025.42
30	1531.05	1531.05	1531.03	1530.95	1530.84	2030.81	2030.81	2030.78	2030.69	2030.61
35	1536.44	1536.44	1536.41	1536.29	1536.14	2036.11	2036.11	2036.07	2035.95	2035.83
40	1541.89	1541.89	1541.86	1541.70	1541.5	2041.46	2041.45	2041.40	2041.24	2041.09
45	1547.41	1547.40	1547.37	1547.16	1546.91	2046.85	2046.84	2046.78	2046.58	2046.38
50	1552.99	1552.98	1552.94	1552.68	1552.36	2052.30	2052.29	2052.21	2051.95	2051.71
	T_1=2500℃					T_1=3000℃				
ΔT \ λ	0.665	1.0	1.6	3	5	0.665	1.0	1.6	3	5
5	2505.02	2505.02	2505.02	2505.01	2505.01	3005.02	3005.01	3005.01	3005.01	3005.01
10	2510.07	2510.07	2510.07	2510.06	2510.05	3010.06	3010.06	3010.06	3010.05	3010.04
15	2515.16	2515.16	2515.15	2515.13	2515.12	3015.14	3015.13	3015.13	3015.11	3015.10
20	2520.29	2520.29	2520.27	2520.24	2520.21	3020.25	3020.24	3020.22	3020.19	3020.17
25	2525.46	2525.45	2525.43	2525.37	2525.33	3025.39	3025.38	3025.35	3025.30	3025.27
30	2530.66	2530.65	2530.62	2530.54	2530.47	3030.56	3030.54	3030.51	3030.44	3030.38
35	2535.90	2535.89	2535.85	2535.73	2535.64	3035.76	3035.74	3035.69	3035.59	3035.52
40	2541.19	2541.17	2541.11	2540.96	2540.84	3041.00	3040.97	3040.91	3040.78	3040.68
45	2546.51	2546.49	2546.41	2546.22	2546.07	3046.27	3046.24	3046.15	3045.99	3045.87
50	2551.87	2551.84	2551.74	2551.51	2551.32	3051.57	3051.53	3051.42	3051.22	3051.07

由于篇幅的关系，表 1 只列出几个典型T_1 值和常用的λ值。ΔT 、T 的单位为℃，λ 的单位为μm。需要其他温度 T_1、ΔT 、λ 计算，完全可以参照上述计算方式计算。

表 1 的计算结果说明，实际高温炉的温度T，并不等同于$T_1 + \Delta T$，其特性为：

1） 计算得出的温度T，均高于$T_1 + \Delta T$；

2） 当T_1 、ΔT 一定时，随着λ 逐渐的增加，T 与$T_1 + \Delta T$ 偏差值逐渐减小；

3） 当λ 、ΔT 一定时，随着T_1 逐渐的增加，

T 与 $T_1+\Delta T$ 偏差值逐渐减小；

4） 当 λ 、T_1 一定时，随着 ΔT 逐渐的增加，T 与 $T_1+\Delta T$ 偏差值逐渐增加。

对于有窗口玻璃的高温炉，采用 $T=T_1+\Delta T$ 辐射方法，既简单又方便。从表 1 中的计算结果可以看出，用本方法，存在一定的偏差，将偏差控制在 0.5℃和 1.0℃内，最大 ΔT 的数值见表 2。

表 2 满足偏差在 0.5℃和 1℃内，最大 ΔT 数值与 T_1 、λ 的关系

Table 2 meet the deviation in 0.5℃ and 1℃, the relationship between the maximum value of ΔT and T_1 , λ

	将偏差控制在 0.5℃					将偏差控制在 1.0℃				
λ / T_1	0.665	1.0	1.6	3	5	0.665	1.0	1.6	3	5
1500	≤20.7	≤20.8	≤21.0	≤21.7	≤23.1	≤29.2	≤29.4	≤29.5	≤30.7	≤32.7
2000	≤23.5	≤23.5	≤24.0	≤25.5	≤27.1	≤33.2	≤33.2	≤33.8	≤35.9	≤38.3
2500	≤26.0	≤26.3	≤26.8	≤28.8	≤30.9	≤36.7	≤37.0	≤37.9	≤40.8	≤43.5
3000	≤28.2	≤28.8	≤29.7	≤32.0	≤34.3	≤40.0	≤40.6	≤41.9	≤45.2	≤48.3

从表 2 中可以看出，在 T_1 一定时，λ 越大，ΔT 也越大；在 λ 一定时，T_1 越大，ΔT 也越大。ΔT 变大，说明在偏差限内，本方法使用范围也就越宽。

从表 1 中的计算结果可以看出，使用"$T=T_1+\Delta T$"测量方法，得出的数据总是小于理论计算值。如使用 1.6μm 波长的辐射温度计，测量时 T_1 =1500℃，2 次测量 ΔT =20℃，用本方法得出的温度 $T=T_1+\Delta T$ =1500+20=1520℃，而从表 1 中查出理论计算值为 1520.45℃，低 0.45℃。如果将测量方法修改为

$$T=T_1+\Delta T+0.5 \quad (20)$$

如果将偏差控制在±0.5℃内使用式（20），那么 ΔT 的数值与表 2 中将偏差控制在 1.0℃时等同，明显地扩大了本方法的使用范围。

对于带宽辐射温度计，计算方法中使用中值波长参照上述计算。但是实际使用中的高温辐射温度计的带宽一般在 1μm 左右，从表 1 中的计算结果可以看出，当 T_1 一定时，对于相邻的波长在 0.5μm 之内，计算结果在 ΔT ≤50℃时，T 最大变化< 0.1℃。所以在实际使用中，对于带宽辐射温度计，积分中值波长可以近似使用算术中值波长代替。

3 实验验证

为了验证公式（7）和公式（20），我们在北京南奇星科技发展有限公司黑体实验室，采用 HG-1 高温黑体进行试验。

HG-1 高温黑体为开口式：工作温度：700~1600℃；腔口直径：Φ30mm；腔口发射率：≥ 0.995；温度稳定性：<±0.1℃/min，<±0.5℃ /10min；辐射温度不确定度：0.3% FS；辐射温度重复性：0.1%FS ；功率：3000W。辐射温度计使用美国 IRCON 高精度辐射温度计 5G-2024 和 52-3024。技术性能见表 3。

表 3 IRCON 辐射温度计技术性能

Table 3 IRCON radiation thermometer technical performance

技术指标	5G-2024	52-3024
工作波长(μm)	1.6	0.85～1.1
测量范围（℃）	350～2000	750～3000
精度	读数的 0.3%+1℃	
重复精度	全量程的 0.1%+1℃	
光学分辨率	D/240	
镜头	可聚焦	

实验的窗口玻璃为南奇星公司的 HG-3 高温黑体的窗口玻璃，材料为石英，厚度为 10mm，为同一批材料厚度相同的 2 块窗口玻璃。

实验时间：2012 年 5 月 30 日。

实验地点：北京南奇星科技发展有限公司黑体实验室

实验过程：首先将辐射温度计在 800mm 处聚焦，测量时位置为聚焦到黑体腔底，测量发射率为 1.0；将黑体温度设定在实验的温度，等温度稳定后，用 2 台辐射温度计分别在没有窗口玻璃、1 块窗口玻璃、2 块窗口玻璃测量 3 次。测量数据见表 4。窗口玻璃放置在黑体外铝口上（见图 1)。

表 4 中的 T 为没有窗口玻璃的测量值，T_1 为有 1 块窗口玻璃的测量值，T_2 为有 2 块窗口玻璃的测量值，分别按照 $T_1+\Delta T$ 式（7）和 $T_1+\Delta T+0.5$ 式（20）的进行处理。

从表 4 中的数据可以看出，式（7）和式（20）的处理结果与 T 很一致，至于还存在一点偏差，因为辐射温度计的分辨率为 1℃，所以难以从测量数

据上进行分析。实验验证表明，对于有窗口玻璃的高温炉，为了克服窗口玻璃的影响，采用本文中的式（7）和式（20）方法是完全切实可行的。

表 4 实验验证数据与结果

Table 4 experimental data and results

	温度	T	T_1	T_2	ΔT	式(7)	式(20)
5G-2024	1200	1202	1186	1171	15	1201	1201.5
	1400	1402	1384	1367	17	1401	1401.5
52-3024	1200	1200	1190	1181	9	1199	1199.5
	1400	1399	1385	1372	13	1398	1398.5

注：表中的数值单位为℃。

4 方法的应用

4.1 有窗口玻璃高温炉的温度控制

对于有玻璃窗口的高温炉，控制单元基本上使用辐射温度计和辐射温度传感器。在温度控制过程中，为了克服窗口玻璃的影响，使用本方法，对温度控制仪表进行补偿，可以提高高温炉内温度控制的准确性。

4.2 辐射温度计高温下的量值传递

在高温下辐射温度计量值传递中，包括 2 个部分：对黑体进行校准；对辐射温度计进行校准。

4.2.1 高温黑体的校准

这里以 HG-3 高温黑体为例，介绍辐射测温方法的使用。HG-3 高温黑体的主要性能指标见表 5。

表 5 HG-3 高温黑体技术指标

Table 5 HG-3 high temperature blackbody technique index

工作温度	800～3000℃
腔口直径	Φ25/30mm
腔口发射率	≥0.99
温度稳定性	<±0.5℃/10min
温度分辨率	0.1℃
辐射温度不确定度	0.3% FS
辐射温度重复性	0.1%FS
控温传感器	高精度红外温度计
辐射温度标准	高精度红外温度计
窗口玻璃	石英玻璃或氟化钙晶体
系统冷却	闭路循环冷却，散热量排到室外
电源功率	3 相 380VAC，45kW
重量	约 700kg

在校准实验中，窗口玻璃采用厚 10mm 的氟化钙晶体，使用了 2 块相同的窗口，安装 1 块，测量使用 1 块。标准辐射温度计为中国计量科学研究院的 RT9032-23#，工作波长为 0.66116μm。证书编号：[99]国量标计证字第 182 号

校准时间：2013 年 10 月 31 日。

校准地址：北京南奇星科技发展有限公司黑体实验室。

校准过程：首先对标准辐射温度计进行聚焦，将辐射温度计放置在聚焦到黑体腔底的位置上，设置测量发射率为 1。启动 HG-3 高温黑体，待温度稳定后，测量黑体温度；增加 1 块窗口玻璃，再次测量温度。实验数据见表 6。

表 6 HG-3 高温黑体校准数据

Table 6 HG-3 high temperature blackbody calibration data

设定温度（℃）	显示温度（℃）	校准数据 T_1	T_2	ΔT	式（7）	修正值
1200	1200.0	1194.1	1188.3	5.8	1199.9	0.1
1400	1400.0	1391.8	1384.1	7.7	1399.5	0.5
1500	1500.1	1490.2	1481.8	8.4	1498.6	1.5
1600	1600.0	1589.0	1579.4	9.6	1598.6	1.4
1800	1800.1	1787.7	1776.3	11.4	1799.1	1.0
2000	2000.1	1983.9	1970.4	13.6	1997.5	2.6
2200	2200.0	2180.1	2163.7	16.4	2196.5	3.5
2300	2300.0	2279.0	2261.8	17.1	2296.1	3.9
2400	2400.0	2376.2	2357.2	19.0	2395.2	4.8
2500	2500.0	2474.9	2454.7	20.2	2495.1	4.9
2600	2600.0	2572.5	2550.7	21.9	2594.4	5.6
2700	2700.0	2670.2	2646.9	23.3	2693.5	6.5
2800	2800.0	2768.3	2743.4	24.9	2793.2	6.8

说明：表 6 中的数值单位为℃，其中 T_1、T_2 测量值，经过了检定证书值修正。表 6 中最大ΔT值为 24.9℃，参照表 2，满足偏差控制在 0.5℃的式（7）计算公式，校准结果见表 6。

4.2.2 高温辐射温度计的校准

高温辐射温度计校准所使用的设备、标准和被校辐射温度计如下：（1）高温黑体：HG-3 高温黑体；生产厂家：北京南奇星科技发展有限公司；编号：HG31322。（2）标准辐射温度计： RT9032-23#标准光电高温计；生产厂家：中国计量科学研究院；证书编号：[99]国量标计证字第 182 号。（3）被校辐射温度计为美国 IRCON 高精度辐射温度计 2 台，性能指标见表 3。型号：5G-2024；生产厂家：美国 IRCON；编号：2419006。型号：5G-3024 ；生产厂家：美国 IRCON；编号：2420005。

校准时间：2013 年 10 月 31 日。

校准地址：北京南奇星科技发展有限公司黑体

实验室。

校准过程：首先对标准和被校辐射温度计进行聚焦，被校温度计聚焦距离为 800mm。将标准和被校辐射温度计测量发射率设置为 1。启动 HG-3 高温黑体，待温度稳定后，交替将标准和被校辐射温度计放置在聚焦到黑体腔底的位置上，测量黑体温度，增加 1 块窗口玻璃，再次测量温度。实验数据记录与处理见表 7 和表 8。

表 7 辐射温度计校准数据 1

Table 7 Calibration data 1 of radiation thermometer

设定温度(℃)	显示温度(℃)	标准数据见表 5	5G-3024				
			T_1	T_2	ΔT	式(20)	修正值
1200	1200.0	1199.9	1190	1181	9	1199.5	0.4
1400	1400.0	1399.5	1385	1374	11	1396.5	3.0
1600	1600.0	1598.6	1581	1567	14	1595.5	3.1
1800	1800.1	1799.1	1778	1761	17	1795.5	3.6
2000	2000.1	1997.5	1974	1953	21	1995.5	2.0
2200	2200.0	2196.5	2171	2147	24	2195.5	1.0
2400	2400.0	2395.2	2370	2342	28	2398.5	-3.3
2500	2500.0	2495.1	2468	2438	30	2498.5	-3.4
2600	2600.0	2594.4	2567	2535	32	2599.5	-5.1

表 8 辐射温度计校准数据 2

Table 8 Calibration data 2 of radiation thermometer2

设定温度（℃）	显示温度（℃）	标准数据见表 5	5G-2024				
			T_1	T_2	ΔT	式(20)	修正值
1400	1400.0	1399.5	1381	1363	18	1399.5	0
1600	1600.0	1598.6	1575	1553	22	1597.5	1.1
1800	1800.1	1799.1	1771	1744	27	1798.5	0.6
2000	2000.1	1997.5	1963	1931	32	1995.5	2

说明：表 7 和表 8 中的数值单位为℃，辐射温度计的校准与 4.2.1 高温黑体的校准是同时进行，因此标准的原始数据见表 6，在表 7 和表 8 中省略原始数据而直接给出处理结果。表 7 中最大ΔT值为 32℃，表 8 中最大ΔT值为 32℃，参照表 2，采用式（20）计算公式计算，偏差为±0.5℃。

对于窗口玻璃材料氟化钙晶体，使用前进行了透过率测量，在波长 0.35～8μm 范围内，透过率均大于 0.95，并且透过率曲线很平整。但从表 6、表 7 和表 8 的测量结果来看，不同的波长，窗口玻璃对温度测量的影响是不一样的。以 1800℃为例，列出 与波长 的关系见表 9。

ΔT λ

表 9 在 1800℃时ΔT与波长λ的关系

Table 9 the relationship of ΔT with wavelength λ at 1800 °C

测量数据	标准辐射温度计 $\lambda=0.66116\mu m$	5G-3024 $\Delta\lambda=0.85\sim1.1\mu m$	5G-2024 $\lambda=1.6\mu m$
T_1（℃）	1787.7	1778	1771
T_2（℃）	1766.3	1761	1744
ΔT（℃）	11.4	17	27

在温度一定时，黑体光谱辐射特性遵循普朗克定律。如果有窗口玻璃，尽管窗口玻璃的透过率一致，也就是说对辐射能量衰减的比例相同，但是显现出温度变化是不一样的。从表 9 中可以看出，对于波长 0.66116μm 和 1.6μm，ΔT分别为 11.4℃和 27℃，尽管波长相差约 0.94μm，而ΔT相差约 15.6℃。

这说明，在校准辐射温度计时，不同的工作波长，ΔT会有很大的变化，ΔT在不同波长之间不能互用。就是相同波长辐射温度计产品，在生产时其工作波长总是存在一定差异，用本文介绍的$T_1+\Delta T$方法，现场实验实时克服窗口玻璃的影响，更具有准确性和实用性。

5 结论

对于有窗口玻璃的高温炉的温度测量，如何克服窗口玻璃的影响一直是个难题。本文通过理论分析、数值计算、实验验证和应用事例，使用克服窗口玻璃的辐射测温方法，具有科学性，合理性，方法简单，方便实用。对于有窗口玻璃的高温炉辐射温度测量、高温辐射温度计的量值传递等应用，具有指导意义。

参考文献

[1] 杨世铭.传热学[M].人民教育出版社.1980

[1] Yang Shiming. Heat transfer [M]. people's education press,.1980

[2] 李吉林等.辐射测温和检定/校准技术[M].中国计量出版.2009

[2] Li Jilin. The radiation temperature measurement and calibration technology of [M]. Chinese Metrology Publishing.2009